

# Syllabus PAQ (UE D)

2023-2024

- **Introduction :**

Ce cours d'introduction à la physique quantique vise à couvrir les bases nécessaires pour résoudre des problèmes simples. Il couvrira dans une première partie le formalisme usuel des opérateurs tant du point de vue ondulatoire que matriciel appliqué aux cas d'école en 1D, et à la théorie quantique du moment cinétique. La deuxième partie abordera les problèmes en symétrie sphérique (atome d'hydrogène), les systèmes de N-particules identiques, les méthodes d'approximations pour états stationnaires et perturbations dépendantes du temps. Le cours est partagé d'une part par un volume équilibré de cours et de TD sur 25h. D'autre part par une série de séminaires sur 10h impartis par de chercheurs et ingénieurs de référence en ingénierie quantique en calcul et simulation, en télécommunications en cryptographie et enfin, métrologie. Ces nouvelles technologies du quantique seront à l'origine d'innovations pratiques et industrielles. A ce jour, les PME quantiques majeures sont Aurea Technology (source de photons jumeaux), Pasqal (accélérateur quantique à base d'atomes froids), CryptoNext (cryptographie post-quantique), Veriqloud (middleware de télécoms quantiques), C12 (qubits à base de nanotubes de carbone), Cryoconcept (cryostats), Muquans (microgravimètres quantiques) et Quandela (sources de qubits photoniques), Alice&Bob (qubits supraconducteurs à faibles taux d'erreur). Idem d'autres filières quantiques spécialisées existent dans les télécommunications et la cryptographie quantiques, qui s'appuient sur de la photonique, ainsi que dans la métrologie, avec encore une fois, une très grande diversité de technologies et donc de compétences. La diversité de la métrologie quantique est aussi grande que dans les qubits. On y trouve de la photonique, de la physique de la matière condensée, des atomes froids piégés par des lasers et des cavités dans des diamants où l'on contrôle le spin d'électrons.

- **Volume horaire (40h total) :**

- 25h de cours/TD (*pour poser des bases de Physique quantiques, e.g. 1<sup>st</sup> révolution quantique*).
- 10h Séminaires des intervenants extérieurs
- 3h Présentations des mini-projet
- 2h DS

- **Contenu :**

**Cours 1: Introduction aux Phénomènes Quantiques (1.15 h CM + 1.15h TD)**

- Effet photoélectrique
- Dualité onde-particule, Fonction d'onde
- Relation de Heisenberg, mesure et perturbation
- Équation de Schrödinger
- TD1 : à compléter

**Cours 2: Formalisme Mathématique et Postulats (2.30 h CM + 2.30h TD)**

- Espace de Hilbert, Notation de Dirac (Kets, Bras), Représentation d'un problème aux valeurs propres, Opérateurs, Commutateurs et Principe d'Indétermination
- Fonction d'Onde, Postulats, Observables, Mesure et Réduction de la Fonction d'Onde, Équation de Schrödinger, Théorème d'Ehrenfest
- TD1 : Particule Quantique en repos et applications numériques
- TD2 : Particule Quantique dans un puit infini du potentiel

**Cours 3 : Problèmes à une dimension (1.15 h CM + 1.15h TD)**

- Puit de potentiel, Barrière de potentiel, Oscillateur Harmonique
- TD1 : à compléter

**Cours 4 : Moments cinétiques en mécanique quantique (2.30 h CM + 2.30h TD)**

- Relations de Commutation et définition
- Moment cinétique orbital, valeurs propres  $L^2$ ,  $L_z$ , harmoniques sphériques
- Moment cinétique de spin, Exp<sup>o</sup> de Stern et Gerlach, Matrices de Pauli
- Composition de moments cinétiques
- Moment magnétique total
- TD1 : à compléter
- TD2 : à compléter

**Cours 5 : Approximation Hamiltonian dépendant du temps (2.30 h CM + 1.15h TD)**

- Théorie des perturbations dépendant du temps, Évolution cohérente, approximation séculaire, E=Évolution incohérente, Relaxation
- TD1 : à compléter

**Cours 6 : Système de particules identiques (1.15 h CM + 1.15h TD)**

- Équation de Schrödinger d'un problème de N particules, opérateur de permutation, postulat de symétrisation
- Classification Fermions-Bosons, principe d'exclusion de Pauli
- Règle de Hund pour un atome
- TD1 : à compléter

**Cours 7 : Systèmes Quantiques Ouverts Méthodes (2h30 CM + 1.15h TD)**

- Couplage entre un système quantique et un environnement, Matrice densité et matrice densité réduite, Équation Maître
- Intrication et décohérence
- TD : à compléter

**Proposition de sujets pour les mini-projets :**

Les inégalités de Bell

Résonance Magnétique Nucléaire

Le processeur Sycamore de google IA

Tomographie par émission de positons

Cryptographie Quantique  
Le MASER  
Le Microscope par Effet Tunnel  
Horloge atomique  
Capteurs TMR  
Mémoire MRAM  
Microscopie TEM, STM  
les Lasers  
Effet Zeeman en astronomie  
Spectroscopie RMN  
Condensat de Bose-Einstein  
Évolution des LED  
Spectroscopie Raman  
Microscopie à centre NV

**Evaluation** : DS (75%) + Projet (25%)

**Bibliographie :**

- *Quantum Mechanics, concepts and applications*, 2<sup>nd</sup> edition, N. Zettili
- *Introduction to Quantum Mechanics*, 2<sup>nd</sup> edition, D. J. Griffiths
- *Mécanique Quantique*, Vol. 1 & 2, Claude Cohen-Tannoudji & Bernard Diu & Franck Laloë, Collection Enseignement des Sciences, Hermann, éditeurs des sciences et des arts
- *Le Monde Quantique*, Michel LE BELLAC EDP Sciences
- *The Feynman Lecture on Physics volume III*, Feynman - Leighton – Sands. The New Millennium Editions