



---

#### 4. Modalités d'Evaluation

---

Les connaissances sont évaluées à travers des contrôles continus, des analyses de textes et un examen final/

- **Contrôles continus (40%) :** (Assiduité, exposés, participation aux TD, tests partiels ...)
- **Examen de fin de semestre (60%)**

---

#### 6. Modalité de validation

---

Le module est validé si la note d'évaluation obtenue est supérieure ou égale à 10/20.

L'étudiant conserve, pour le rattrapage, les notes obtenues dans les éléments du module qui sont supérieures ou égales 10/20. La note de rattrapage est prise en compte sans que la note du module dépasse 10/20.

---

#### 7. Plan Du Cours

---

<b>CHAPITRE 1 : Introduction et fondements</b>		
<b>Semaine 1</b>	<b>Séance 1</b>	<b>Origines de la mécanique quantique</b> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Introduction historique et limites de la mécanique classique.</li><li>○ Le concept de quantification de l'énergie (Planck).</li><li>○ La dualité onde-particule (Hypothèse de De Broglie).</li></ul>
	<b>Séance 2</b>	<b>Expériences fondatrices</b> <ul style="list-style-type: none"><li>○ L'effet photoélectrique et l'interprétation d'Einstein.</li><li>○ L'effet Compton et la diffusion des photons.</li><li>○ Expérience des fentes de Young et nature ondulatoire de la matière.</li></ul>
<b>Semaine 2</b>	<b>Séance 3</b>	<b>TD : Applications des expériences fondatrices</b> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Résolution de l'exercice sur l'effet photoélectrique (travail d'extraction, énergie cinétique).</li><li>○ Modélisation de la diffusion Compton (collision photon-électron).</li><li>○ Modèle de Bohr et constante de Rydberg (Loi de Balmer).</li></ul>
	<b>CHAPITRE 2 : Equation de Schrödinger et Systèmes 1D</b>	
	<b>Séance 4</b>	<b>Formulation de l'équation fondamentale</b> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Construction de l'équation de Schrödinger dépendante du temps.</li><li>○ Equation de Schrödinger indépendante du temps (états stationnaires).</li><li>○ Signification physique et conditions aux limites.</li></ul>

<b>Semaine 3</b>	<b>Séance 5</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Fonction d'onde et probabilités</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Interprétation probabiliste de la fonction d'onde (Règle de Born).</li> <li>○ Densité de probabilité et condition de normalisation.</li> <li>○ Notion de paquets d'ondes et vitesse de groupe/phase.</li> </ul>
	<b>Séance 6</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Puits de potentiel infini</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Modélisation d'une particule libre dans une boîte 1D.</li> <li>○ Résolution de l'équation de Schrödinger pour le puits infini.</li> <li>○ Continuité de la fonction d'onde et des dérivées.</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b><u>Quantification et états propres</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Quantification des niveaux d'énergie. (Simulation : PhET - États liés quantiques)</li> <li>○ Représentation graphique des fonctions d'onde et densités.</li> <li>○ Energie du point zéro et sa signification physique.</li> </ul>
<b>Semaine 4</b>	<b>Séance 7</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>TD : Ondes de matière et puits infini symétrique</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Calculs sur les ondes de matière de Louis de Broglie.</li> <li>○ Application du principe d'incertitude d'Heisenberg.</li> <li>○ Résolution et tracé des fonctions d'onde pour un puits infini symétrique.</li> </ul>
	<b>Séance 8</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Puits de potentiel fini</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Étude de la particule dans un puits de potentiel de profondeur finie.</li> <li>○ Distinction entre états liés et états de diffusion.</li> <li>○ Comparaison avec les prédictions de la mécanique classique.</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b><u>Effet tunnel quantique</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Particule face à une barrière de potentiel.</li> <li>○ Calcul du coefficient de transmission et de réflexion.</li> <li>○ Applications physiques. (Simulation : PhET - Effet Tunnel).</li> </ul>

## CHAPITRE 3 : Formalisme mathématique de la MQ

Semaine 5	Séance 9	<p style="text-align: center;"><b><u>TD : Barrières et marches de potentiel</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Étude analytique d'une barrière de potentiel.</li> <li>○ Étude d'une marche de potentiel pour un état <math>E &lt; V_0</math> et <math>E &gt; V_0</math>.</li> <li>○ Calcul détaillé des coefficients de réflexion (R) et de transmission (T).</li> </ul>
	Séance 10	<p style="text-align: center;"><b><u>Espaces des états et Kets (Notation de Dirac)</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Introduction à l'espace de Hilbert (espace vectoriel complexe).</li> <li>○ Les vecteurs "Kets" <math> \Psi\rangle</math> et leurs propriétés.</li> <li>○ Décomposition d'un ket dans une base orthonormée discrète.</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b><u>Bras et Produit scalaire</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Les vecteurs "Bras" <math>\langle\Psi </math> appartenant à l'espace dual.</li> <li>○ Définition et propriétés du produit scalaire <math>\langle\phi \Psi\rangle</math>.</li> <li>○ Représentation matricielle (kets en colonne, bras en ligne)</li> </ul>
Semaine 6	Séance 11	<p style="text-align: center;"><b><u>Opérateurs linéaires et Observables</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Définition et action d'un opérateur linéaire sur un ket.</li> <li>○ Opérateurs adjoints et opérateurs hermitiens.</li> <li>○ Définition d'une observable physique en tant qu'opérateur hermitien.</li> </ul>
	Séance 12	<p style="text-align: center;"><b><u>TD : Valeurs propres et vecteurs propres</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Résolution de l'équation aux valeurs propres <math>A \Psi\rangle = \lambda \Psi\rangle</math>.</li> <li>○ Formulation de l'équation caractéristique (déterminant nul).</li> <li>○ Dégénérescence des valeurs propres et base de vecteurs propres.</li> </ul>
Semaine 7	Séance 13	<p style="text-align: center;"><b><u>Algèbre des commutateurs</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Définition du commutateur <math>[A, B]</math> de deux opérateurs.</li> <li>○ Propriétés algébriques et conséquences physiques de la commutation.</li> <li>○ Ensemble Complet d'Observables qui Commutent (ECOC).</li> </ul>
	Séance 14	<p style="text-align: center;"><b><u>Relations de Heisenberg</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Démonstration mathématique des relations d'incertitude.</li> <li>○ Non-commutation des opérateurs position et impulsion <math>[X, P_x]</math>.</li> <li>○ Signification physique profonde de l'inégalité d'Heisenberg.</li> </ul>

<b>Semaine 8</b>	<b>Séance 15</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>TD : Manipulation de l'espace d'état</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Exercices sur les projecteurs et les opérateurs identité.</li> <li>○ Changement de base et relations de fermeture.</li> <li>○ Calcul de la trace d'un opérateur et propriétés matricielles.</li> </ul>
	<b>Séance 16</b>	<b>Contrôle continue N° 1 / Correction contrôle continue N° 1.</b>
<b>CHAPITRE 4 : Postulats de la mécanique quantique</b>		
<b>Semaine 9</b>	<b>Séance 17</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Définition de l'État et des Observables (Postulats 1 &amp; 2)</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1<sup>er</sup> Postulat : L'état d'un système défini par un ket <math> \Psi\rangle</math>.</li> <li>○ 2<sup>ème</sup> Postulat : Toute grandeur physique est décrite par une Observable.</li> <li>○ Formalisation du principe de superposition des états quantiques.</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b><u>Le processus de Mesure (Postulat 3)</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Détermination des résultats possibles de la mesure (valeurs propres).</li> <li>○ Calcul de probabilité d'obtenir une valeur propre dégénérée ou non.</li> <li>○ Le postulat de la réduction du paquet d'onde après une mesure.</li> </ul>
	<b>Séance 18</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Évolution temporelle (Postulats 4 &amp; 5)</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 4<sup>ème</sup> Postulat : Conservation de la norme au cours du temps.</li> <li>○ 5<sup>ème</sup> Postulat : Évolution de la valeur moyenne d'une observable.</li> <li>○ Démonstration et importance du Théorème d'Ehrenfest.</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b><u>Interprétation et Constantes du mouvement</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Constantes du mouvement : observables commutant avec l'Hamiltonien.</li> <li>○ L'interprétation de Copenhague et ses implications épistémologiques.</li> <li>○ Débats historiques fondateurs (Einstein vs Bohr)</li> </ul>
<b>Semaine 10</b>	<b>Séance 19</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Mécanique des états superposés</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Étude mathématique approfondie des combinaisons linéaires d'états.</li> <li>○ Phénomènes d'interférences quantiques et cohérence.</li> <li>○ Discussion sur les paradoxes célèbres (Le chat de Schrödinger).</li> </ul>
	<b>Séance 20</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>TD : Exercices d'application</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Résolution de problèmes combinant Hamiltonien et observables.</li> <li>○ Vérification du théorème d'Ehrenfest sur des cas simples.</li> <li>○ Analyse comparative des états stationnaires vs non-</li> </ul>

		<p>stationnaires.</p> <p style="text-align: center;"><b><u>TD : Prédictions physiques et calculs</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Effet analytique des états superposés sur la valeur moyenne d'une mesure.</li> <li>○ Calcul de l'évolution temporelle d'un état superposé spécifique.</li> <li>○ Exercices types sur la superposition de deux états d'énergie.</li> </ul>
<b>CHAPITRE 5 : Oscillateur harmonique et Ouvertures</b>		
<b>Semaine 11</b>	<b>Séance 21</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Modélisation de l'Oscillateur Harmonique</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Construction de l'Hamiltonien de l'oscillateur harmonique à 1D.</li> <li>○ Résolution analytique et introduction aux polynômes d'Hermite.</li> <li>○ Introduction des opérateurs de création et d'annihilation.</li> </ul>
	<b>Séance 22</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>TD : Implications de l'Oscillateur Harmonique</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Analyse du spectre d'énergie (quantification en niveaux équidistants).</li> <li>○ Mise en évidence de l'énergie de point zéro de l'oscillateur.</li> <li>○ Applications physiques modernes (vibrations moléculaires, phonons).</li> </ul>
<b>Semaine 12</b>	<b>Séance 23</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Avancées récentes et technologies quantiques</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Le Prix Nobel de Chimie 2023 : Les boîtes quantiques (Quantum Dots).</li> <li>○ Le Prix Nobel de Physique 2025 : L'effet tunnel à l'échelle macroscopique.</li> <li>○ Applications pratiques en microscopie.</li> </ul>
	<b>Séance 24</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Avancées récentes et technologies quantiques</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Principes fondamentaux de l'informatique quantique.</li> <li>○ Différence entre Bits classiques et Qbits (superposition).</li> </ul>
<b>Semaine 13</b>	<b>Séance 25</b>	<p style="text-align: center;"><b><u>Synthèse et Révisions</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Retour sur l'équation de Schrödinger et les puits/barrières.</li> <li>○ Synthèse des outils mathématiques (Dirac, Commutateurs).</li> <li>○ Questions de réflexion théorique.</li> <li>○ Entraînement sur l'application conjointe des 5 Postulats.</li> <li>○ L'interprétation de Copenhague et débats historiques fondateurs.</li> <li>○ Correction orale d'un problème type "Examen final".</li> </ul>
	<b>Séance 26</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Contrôle continue N° 2 / Correction contrôle continue N° 2.</b></li> </ul>
<b>Examen Fin de Module</b>		

- Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., & Laloë, F. (1973). Mécanique quantique (Vol. 2, p. 1406). Paris: Hermann ;
- Aslangul, C. (2018). Mécanique quantique 1: Fondements et premières applications. De Boeck Supérieur
- Messiah, A. (1959). Mécanique quantique (Vol. 1). Hermann
- Greiner, W. (2011). Quantum mechanics: an introduction. Springer Science & Business Media.
- Merzbacher, E. (1998). Quantum mechanics. John Wiley & Sons.
- Messiah, A. (2014). Quantum mechanics. Courier Corporation.

**Simulations Numériques :**

- <https://phet.colorado.edu/sims/cheerj/photoelectric/latest/photoelectric.html?simulation=photoelectric&locale=fr>.
- [https://phet.colorado.edu/sims/html/models-of-the-hydrogen-atom/latest/models-of-the-hydrogen-atom\\_all.html?locale=fr](https://phet.colorado.edu/sims/html/models-of-the-hydrogen-atom/latest/models-of-the-hydrogen-atom_all.html?locale=fr)
- [https://phet.colorado.edu/sims/html/models-of-the-hydrogen-atom/latest/models-of-the-hydrogen-atom\\_all.html?locale=fr](https://phet.colorado.edu/sims/html/models-of-the-hydrogen-atom/latest/models-of-the-hydrogen-atom_all.html?locale=fr)
- <https://phet.colorado.edu/fr/simulations/wave-interference>
- <https://phet.colorado.edu/fr/simulations/quantum-tunneling>
- <https://phet.colorado.edu/fr/simulations/bound-states>