

Université de
Sherbrooke

Département de physique

PHQ 633 – Principes physiques des ordinateurs quantiques

Plan d'activité pédagogique

Automne 2025

Enseignant	Alexandre Blais
Courriel :	alexandre.blais@usherbrooke.ca
Local :	D2-2067 (ACCES D2-22)
Téléphone :	+1 819 821-8000 x65250
Disponibilités :	Lors des séances de cours et sur rendez-vous.

Site web du cours : <https://moodle.usherbrooke.ca>

Horaire	Exposé magistral :	Lundi	8h30 à 10h20	salle À venir
		Mardi	8h30 à 10h20	salle À venir

Description officielle de l'activité pédagogique¹

Cibles de formation :	Comprendre les principes physiques à la base des dispositifs de traitement de l'information quantique.
Contenu :	Notions de base de l'information quantique. Types de qubits et architectures d'ordinateurs quantiques (supraconducteurs, spins, ions). Couplage avec l'environnement : dissipation et déphasage. Lecture des qubits. Réalisation physique des opérations logiques. Défis de la mise à l'échelle. Notions de capteurs quantiques.
Crédits	3
Organisation	3 heures d'exposé magistral par semaine 6 heures de travail personnel par semaine
Préalable	PHQ434
Particularités	Aucune

¹<https://www.usherbrooke.ca/admission/fiches-cours/phq633>

1 Présentation

Cette section présente les cibles de formation spécifiques et le contenu détaillé de l'activité pédagogique. Cette section, non modifiable sans l'approbation du comité de programme du Département de physique, constitue la version officielle.

1.1 Mise en contexte

Au cours du XXe siècle, l'informatique classique a connu une évolution sans précédent, passant des premiers ordinateurs de très grande taille à des dispositifs miniaturisés dotés de puissances de calcul impressionnantes. Toutefois, malgré ces avancées, certains défis computationnels demeurent hors de portée des ordinateurs classiques. C'est dans ce contexte que l'informatique quantique a émergé, offrant une nouvelle perspective sur le traitement de l'information. Les ordinateurs quantiques, s'appuyant sur les principes de la mécanique quantique, ouvrent la voie à des solutions pour des problèmes autrefois jugés insurmontables. Dans ce cours, nous mettrons l'accent sur les circuits quantiques supraconducteurs, l'architecture d'ordinateur quantique actuellement la plus étudiée. Après avoir exploré en détail cette architecture, nous pourrions établir des parallèles avec d'autres approches, offrant ainsi une perspective plus complète sur l'état de l'art du développement de l'ordinateur quantique. Au-delà de la conception de l'ordinateur quantique, l'étude de ces architectures nous conduit à explorer des systèmes quantiques macroscopiques, repoussant les frontières de notre compréhension traditionnelle de la mécanique quantique, qui s'étend désormais bien au-delà de la physique des systèmes atomiques. Cette exploration des systèmes quantiques à grande échelle est fascinante en elle-même et constitue un pont vers de nouvelles découvertes fondamentales en physique.

1.2 Cibles de formation spécifiques

1. Comprendre les principes physiques à la base des dispositifs de traitement de l'information quantique.
2. Avec l'accent mis sur les dispositifs supraconducteurs, se familiariser avec les circuits supraconducteurs quantiques dont les résonateurs micro-ondes et les qubits supraconducteurs.
3. Se familiariser avec le couplage lumière-matière dans les circuits électriques, les opérations logiques, la mesure des qubits et les défis de la mise à l'échelle.

1.3 Contenu détaillé

Thème	Contenu	Nbr. d'heures	Objectifs
1	1. Notions de base de l'information quantique : (a) Qubits et opération logiques (b) Critères de DiVincenzo	2	1
2	2. Oscillateurs harmoniques : (a) Oscillateurs LC et photons micro-ondes (b) Méthode pour obtenir l'Hamiltonien d'un circuit électrique (c) Résonateurs micro-ondes continus (d) Oscillateurs harmoniques entretenus (e) Référentiels tournants (f) États cohérents	5	1, 2
3	3. Qubits supraconducteurs : (a) Jonctions Josephson (b) Transmon (c) Autres qubits supraconducteurs*	5	1, 2
4	4. Interaction lumière-matière dans les circuits : (a) Hamiltonien Jaynes-Cummings (b) Régimes résonant et dispersif	5	3
5	5. Interaction avec l'environnement : (a) Dissipation dans les systèmes quantiques : Matrice densité et équations maîtresses (b) Relaxation et déphasage des qubits (T1 et T2)	5	1, 2, 3
6	6. Mesure dispersive : (a) Chaîne de détection du champ micro-onde (b) Lecture dispersive des qubits	5	1, 2, 3
7	7. Informatique quantique avec les circuits supraconducteurs : (a) Opérations logiques à un qubit qubit et à deux qubits (b) Les défis de la mise à l'échelle	5	1, 2, 3

Table 1:

Thème	Contenu	Nbr. d'heures	Objectifs
8	8. Optique quantique aux fréquences micro-ondes* : (a) Amplification limitée quantiquement (b) Champs micro-ondes comprimés	5	1, 2, 3
9	9. Autres plateformes* : (a) Qubits de spins (b) Ions piégés	4	1, 2, 3
10	10. Perspectives	4	1, 2, 3

2 Organisation

Cette section propre à l'approche pédagogique de chaque enseignante ou enseignant présente la méthode pédagogique, le calendrier, le barème et la procédure d'évaluation ainsi que l'échéancier des travaux. Cette section doit être cohérente avec le contenu de la section précédente.

2.1 Méthode pédagogique

1. Exposés magistraux et échanges en classe (3 heures par semaine); 2. Exercices dirigés (1 heure par semaine).

2.2 Calendrier

Semaine	Commençant le	Thème
1	2025-08-25	1
2	2025-09-01	2
3	2025-09-08	2
4	2025-09-15	2 et 3
5	2025-09-22	3
6	2025-09-29	4
7	2025-10-06	Révision et 4
8	2025-10-13	Semaine des examens périodiques
9	2025-10-20	Relâche
10	2025-10-27	5
11	2025-11-03	5 et 6
12	2025-11-10	6 et 7
13	2025-11-17	7 et 8
14	2025-11-24	8 et 9
15	2025-12-01	9 et 10
16	2025-12-08	Révision et 10
17	2025-12-15	Semaine des examens finals

2.3 Évaluation

Type de l'évaluation	Pondération	Utilisation des IAG
Devoirs	25 %	Interdite ●
Examen intra	30 %	Interdite ●
Examen final	45 %	Interdite ●

Les dates des examens seront fixées par la faculté. Les devoirs, réalisés en équipes de deux, doivent être soumis en un seul exemplaire par équipe. Les dates de remise des devoirs seront précisées pendant les cours. Les devoirs doivent être remis au début du cours spécifié, et une pénalité de 10% par jour sera appliquée aux devoirs en retard. Un devoir rendu après la présentation de la solution recevra la note de 0. Les devoirs et les examens doivent être présentés de manière lisible, avec suffisamment de commentaires pour rendre la démarche claire.

Note : L'examen final des étudiants inscrits au cours PHY739 comportera au moins une question supplémentaire par rapport à celui du PHQ633. Alternativement, l'évaluation pourrait inclure un projet de fin de session ou des numéros supplémentaires dans les devoirs. Le choix entre ces types d'évaluation sera effectué au cours de la session. Si l'option du projet est retenue, ce dernier comptera pour 15% de la note finale (ce pourcentage sera réparti proportionnellement entre les devoirs, l'examen intratrimetriel et l'examen final), et les détails seront discutés en classe.

Note : En cas de circonstances extraordinaires au-delà du contrôle de l'Université et sur décision de celle-ci, l'évaluation des apprentissages et le calendrier des séances de ce cours sont sujets à changement.

2.3.1 Qualité de la langue et de la présentation

Conformément à l'article 17 du Règlement facultaire d'évaluations des apprentissages² la personne du corps enseignant peut retourner à la personne étudiante tout travail non conforme aux exigences quant à la qualité de la langue et aux normes de présentation.

2.3.2 Plagiat

Le plagiat consiste à utiliser des résultats obtenus par d'autres personnes afin de les faire passer pour sien et dans le dessein de tromper le corps enseignant. Vous trouverez en annexe un document d'information relatif à l'intégrité intellectuelle qui fait état de l'article 9.4.1 du Règlement des études³. Lors de la correction de tout travail individuel ou de groupe, une attention spéciale sera portée au plagiat. Si le plagiat est attesté par une preuve, cela sera traité comme un délit aux études, en conformité avec l'article 9.4.1 du Règlement des études de l'Université de Sherbrooke. La personne étudiante peut s'exposer à de graves sanctions qui peuvent être soit l'attribution de la note E ou de la note zéro (0) pour un travail, un examen ou une activité évaluée, soit de reprendre un travail, un examen ou une activité pédagogique. Tout travail suspecté de plagiat sera transmis au secrétaire de la Faculté des sciences. Ceci n'indique pas que vous n'avez pas le droit de coopérer entre deux équipes, tant que la rédaction finale des documents et la création du programme restent le fait de votre équipe. En cas de doute de plagiat, le corps enseignant peut demander à l'équipe d'expliquer la partie considérée comme plagiée. En cas d'incertitude, ne pas hésiter à demander conseil et assistance au corps enseignant afin d'éviter toute situation délicate par la suite.

²https://www.usherbrooke.ca/sciences/fileadmin/sites/sciences/documents/Etudiants_actuels/Informations_academiques_et_reglements/2017-10-27_Reglement_facultaire_-_evaluation_des_apprentissages.pdf

³<https://www.usherbrooke.ca/registraire/droits-et-responsabilites/reglement-des-etudes/>

2.4 Échéancier des travaux

Les dates de remise des travaux seront indiquées sur les énoncés.

2.5 Utilisation d'appareils électroniques et du courriel

Selon le règlement complémentaire des études, section 4.2.3⁴, l'utilisation d'ordinateurs, de cellulaires ou de tablettes pendant une prestation est interdite à condition que leur usage soit explicitement permise dans le plan de cours.

Dans ce cours, l'usage de téléphones cellulaires, de tablettes ou d'ordinateurs est autorisé. Cette permission peut être retirée en tout temps si leur usage entraîne des abus.

Tel qu'indiqué dans le règlement universitaire des études, section 4.2.3⁵, toute utilisation d'appareils de captation de la voix ou de l'image exige la permission de la personne enseignante.

Note : Je réponds aux questions posées par courriel à l'extérieur des périodes de cours.

3 Matériel nécessaire pour l'activité pédagogique

Aucun manuel n'est obligatoire, mais les références suivantes sont utiles afin d'approfondir la matière vue en classe. 1. A. Blais, A.L. Grimsmo, S.M. Girvin and A. Wallraff, Circuit Quantum Electrodynamics, Rev. Mod. Phys. **93**, 025005 (2021) 2. P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T. P. Orlando, S. Gustavsson, W. D. Oliver, A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits, Applied Physics Reviews **6**, 021318 (2019) 3. M.A. Nielsen and I.L. Chuang, Quantum computation and quantum information, Cambridge University Press, 2000. cote : QA 76.889 N54 4. J. Preskill, Lecture notes on quantum computation.

⁴https://www.usherbrooke.ca/sciences/fileadmin/sites/sciences/documents/Etudiants_actuels/Informations_academiques_et_reglements/Sciences_Reglement_complementaire.pdf

⁵<https://www.usherbrooke.ca/registraire/droits-et-responsabilites/reglement-des-etudes/>

L'intégrité intellectuelle passe, notamment, par la reconnaissance des sources utilisées. À l'Université de Sherbrooke, on y veille!

Extrait du Règlement des études (Règlement 2575-009)

9.4.1 DÉLITS RELATIFS AUX ÉTUDES

Un délit relatif aux études désigne tout acte trompeur ou toute tentative de commettre un tel acte, quant au rendement scolaire ou une exigence relative à une activité pédagogique, à un programme ou à un parcours libre.

Sont notamment considérés comme un délit relatif aux études les faits suivants :

- a) commettre un plagiat, soit faire passer ou tenter de faire passer pour sien, dans une production évaluée, le travail d'une autre personne ou des passages ou des idées tirés de l'œuvre d'autrui (ce qui inclut notamment le fait de ne pas indiquer la source d'une production, d'un passage ou d'une idée tirée de l'œuvre d'autrui);
 - b) commettre un autoplagiat, soit soumettre, sans autorisation préalable, une même production, en tout ou en partie, à plus d'une activité pédagogique ou dans une même activité pédagogique (notamment en cas de reprise);
 - c) usurper l'identité d'une autre personne ou procéder à une substitution de personne lors d'une production évaluée ou de toute autre prestation obligatoire;
 - d) fournir ou obtenir toute aide non autorisée, qu'elle soit collective ou individuelle, pour une production faisant l'objet d'une évaluation;
 - e) obtenir par vol ou toute autre manœuvre frauduleuse, posséder ou utiliser du matériel de toute forme (incluant le numérique) non autorisé avant ou pendant une production faisant l'objet d'une évaluation;
 - f) copier, contrefaire ou falsifier un document pour l'évaluation d'une activité pédagogique;
- [...]

Par plagiat, on entend notamment :

- Copier intégralement une phrase ou un passage d'un livre, d'un article de journal ou de revue, d'une page Web ou de tout autre document en omettant d'en mentionner la source ou de le mettre entre guillemets;
- reproduire des présentations, des dessins, des photographies, des graphiques, des données... sans en préciser la provenance et, dans certains cas, sans en avoir obtenu la permission de reproduire;
- utiliser, en tout ou en partie, du matériel sonore, graphique ou visuel, des pages Internet, du code de programme informatique ou des éléments de logiciel, des données ou résultats d'expérimentation ou toute autre information en provenance d'autrui en le faisant passer pour sien ou sans en citer les sources;
- résumer ou paraphraser l'idée d'un auteur sans en indiquer la source;
- traduire en partie ou en totalité un texte en omettant d'en mentionner la source ou de le mettre entre guillemets ;
- utiliser le travail d'un autre et le présenter comme sien (et ce, même si cette personne a donné son accord);
- acheter un travail sur le Web ou ailleurs et le faire passer pour sien;
- utiliser sans autorisation le même travail pour deux activités différentes (autoplagiat).

Autrement dit : mentionnez vos sources

Balises d'utilisation des outils d'intelligence artificielle générative

Autorisés ou pas dans les situations d'apprentissage et d'évaluation ?

NIVEAU 0

NIVEAU 1

NIVEAU 2

NIVEAU 3

NIVEAU 4

L'utilisation des outils d'intelligence artificielle générative (IAg) est limitée, voire complètement interdite parce que la personne enseignante considère que l'usage de ces outils nuit au développement de compétences essentielles. Ces compétences peuvent être disciplinaires, comme elles peuvent être d'ordre méthodologique, rédactionnel ou informationnel. Considérant que l'utilisation des IAg requiert un esprit critique, il peut s'agir d'une situation d'apprentissage ou d'évaluation sans IAg qui vise à développer celui-ci.

Dans ces situations, **la personne étudiante produit le travail.**

L'utilisation prononcée des IAg est permise parce que la personne enseignante considère que les personnes étudiantes sont en mesure d'exercer un esprit critique et sont capables de juger de la qualité des contenus produits par les IAg. Ou encore, l'utilisation est encouragée parce que la situation d'apprentissage ou d'évaluation proposée contribue à développer leur esprit critique.

Dans ces situations, l'IAg produit le travail préliminaire, alors que **la personne étudiante s'assure de sa qualité en l'améliorant.**



Utilisation interdite

Le **NIVEAU 0** signifie que l'**utilisation est interdite**.

Ceci signifie que si la personne enseignante a un motif de croire qu'il y a eu l'utilisation d'une IAg dans une situation d'évaluation, elle doit dénoncer les faits auprès de la personne responsable des dossiers disciplinaires universitaires. Il s'agit d'un délit relatif aux études tel que stipulé dans le [Règlement des études](#).



Utilisation limitée

Le **NIVEAU 1 D'UTILISATION** signifie que l'**utilisation est autorisée uniquement pour assister l'apprentissage dans le domaine disciplinaire ou des langues**.

Dans ce contexte, la personne étudiante **est tenue de déclarer l'utilisation qu'elle en a faite** selon les consignes fournies par la personne enseignante sans quoi l'utilisation peut être considérée comme un délit. Par exemple :

Domaine disciplinaire :

- S'inspirer
- Générer des idées
- Explorer un sujet pour mieux le comprendre
- Générer du matériel pour apprendre

Domaine des langues :

- Identifier ses erreurs et se les faire expliquer
- Reformuler un texte
- Générer un plan pour aider à structurer un texte
- Traduire un texte



Utilisation guidée

Le **NIVEAU 2 D'UTILISATION** signifie que l'**utilisation est autorisée pour améliorer un travail produit par la personne étudiante**.

Dans ce contexte, la personne étudiante **est tenue de déclarer l'utilisation qu'elle en a faite** selon les consignes fournies par la personne enseignante sans quoi l'utilisation est considérée comme un délit. Par exemple :

- Analyser des contenus
- Obtenir une rétroaction
- Évaluer la qualité de son travail à partir de critères
- Demander à être confronté relativement à ses idées, à sa démarche
- Diriger les processus de résolution de problèmes



Utilisation balisée

Le **NIVEAU 3 D'UTILISATION** signifie que l'**utilisation est autorisée pour produire un travail qui sera amélioré**.

Dans ce contexte, la personne étudiante **est tenue de citer selon les normes¹ le contenu généré par l'IAg ou de déclarer l'utilisation qu'elle en a faite** selon les consignes fournies par la personne enseignante sans quoi l'utilisation est considérée comme un délit. Par exemple :

- Résumer ou rédiger des parties d'un texte
- Générer un texte ou un modèle d'une production et l'adapter
- Réaliser des calculs mathématiques
- Produire du code informatique
- Résoudre des problèmes complexes
- Répondre à une question
- Générer des images, ou autres contenus multimédias



Utilisation libre

Le **NIVEAU 4 D'UTILISATION** signifie qu'**aucune restriction spécifique n'est imposée**.

Dans ce contexte, la personne étudiante **est tenue de citer selon les normes¹ le contenu généré par l'IAg ou de déclarer l'utilisation qu'elle en a faite** selon les consignes fournies par la personne enseignante sans quoi l'utilisation est considérée comme un délit.

Ce niveau inclut tout ce qui précède, de l'exploration à la production, ainsi que toute autre tâche particulière jugée complexe.

À considérer avant l'utilisation d'outils d'intelligence artificielles génératives

Si, en tant que personne étudiante envisagez d'utiliser un outil d'intelligence artificielle générative (IAG) lorsque l'évaluation autorise les niveaux 1 à 4 d'utilisation mentionnés précédemment.

Dans ce cas, gardez à l'esprit les éléments clés suivants.

- Vous assumez la responsabilité de tout le contenu produit, avec ou sans IAG, et intégré à votre production.
- Les produits des outils d'IAG peuvent très souvent comporter **des erreurs ou des faussetés** (hallucinations) : on doit donc impérativement valider tout contenu généré par ces outils.
- Dans l'état actuel de la Loi sur le droit d'auteur du Canada, les **productions faites par l'IAG sont du domaine public**, puisque les outils d'IAG ne sont pas reconnus comme des auteurs au sens de la Loi et que les contenus générés ne répondent pas aux critères d'une œuvre protégée, notamment aux critères d'originalité.
- L'entreprise qui fournit le service pourrait émettre certaines exigences dans ses conditions d'utilisation. Comme l'algorithme et le code informatique appartiennent à l'entreprise qui les a développés, nous devons tenir compte de ces conditions. Celles-ci pourraient également fournir des précisions relatives à la **réutilisation des données soumises (confidentialité)**.

Comment déclarer l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle générative

Dans l'esprit d'une conduite intègre et responsable, vous devez TOUJOURS mentionner de façon explicite toute utilisation de l'intelligence artificielle, conformément au Règlement des études (9.4.1 Délits relatifs aux études). De plus, à des fins pédagogiques, il est recommandé de toujours intégrer à la production les requêtes, de même que les réponses intégrales générées par les outils d'IAG. Celles-ci pourront être intégrées directement dans le corps du texte ou en note de bas de page. Les réponses longues pourraient être insérées en annexe de votre document ou dans des documents supplémentaires, selon les directives de la personne enseignante.

L'utilisation de ces deux documents s'avèrera utile, ils se trouvent sous licence libre, donc vous pouvez utiliser les tableaux et les adapter selon votre besoin:

1. [Modèle de citation](#) : Ce formulaire, à remplir par l'enseignant, donne un exemple aux étudiants de citation de l'IAG dans la réalisation d'un travail évalué ou non.
2. [Déclaration d'usage](#) : Ce formulaire, à remplir par les étudiants, doit être remis avec une réalisation afin de déclarer l'usage de l'IAG dans la réalisation, qu'elle soit évaluée ou non.

Référence

La Faculté des sciences tient à remercier le SSF pour la production des documents.

- Cabana, M. et Côté, J.-A. (2024). Balises d'utilisation des outils d'intelligence artificielle générative. Service de soutien à la formation, Université de Sherbrooke. Sous licence [CC BY 4.0](#).
- Cabana, M. et Beaudet, M. (2024). Directives de déclaration de l'utilisation de l'intelligence artificielle générative dans une production étudiante. Service de soutien à la formation, Université de Sherbrooke. Sous licence [CC BY 4.0](#).
- Cabana, M. (2024). Formulaire de déclaration de l'utilisation de l'intelligence artificielle générative dans une production étudiante. Service de soutien à la formation, Université de Sherbrooke. Sous licence [CC BY 4.0](#).